

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

放電場における力学と  
マイクロ駆動機構への応用に関する研究  
Investigation of Force in Discharge Field  
and its Applications for Micromechanical Actuators

申 請 者

梅 津 信二郎

氏 名

Shinjiro Umezu

専攻・研究指導  
(課程内のみ)

機械工学専攻 精密工学研究

2005 年 10 月

静電力を利用する機械は，真空中や電磁環境に対する適性が高いこと，マイクロ化することによって磁気力などに比べて相対的に大きな力が得られることなどの利点がある．このため，半導体製造プロセスの発展を背景に，1970 年頃から静電力駆動のマイクロマシン/MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) に関する研究開発が盛んに行われている．とくにマイクロマシンをセンサや情報機器，医学，バイオテクノロジーの分野で利用する場合，圧力計・加速度計，マイクロ化学システム ( $\mu$ -TAS) などのように，そのマイクロ化が第一に重要であり，微細加工技術に関する膨大な研究がおこなわれている．

いっぽう，駆動する媒体が紙葉体やシリコンウエハ，粒体などの場合には，駆動機構も適切な大きさであることが必要であり，駆動機構の大きさと駆動距離共に mm ~ cm オーダで適切な機能を有した静電駆動機構に対するニーズも大きい．本研究ではこのような観点から，静電力応用の基盤となる静電場・放電場における力学とそれをマイクロ駆動機構へ応用することを狙いとした．

とくにこれまでの静電力応用の研究は放電の生じない静電界におけるクーロン力を利用するものに限られていたが，本研究では放電域における力学作用を研究し，それを積極的に利用することを行った．すなわち，静電力を利用しようとする場合，電界が高いほど高出力が得られるが，ある限界電圧以上で放電が生じ，これが障害となって出力密度に限界が生じる．このため，静電力利用の立場からは，放電は防ぐべきものであるというのが一般的なコンセンサスであった．しかし放電時には，単に電離電流が流れるだけでなく非放電時の静電力とは異なる力学作用が生じていることに着目し，そのメカニズムを調べ，さらにそれを駆動機構に応用する研究を行った．

すなわち本研究では，まず静電場，コロナ放電場および火花放電場における力学特性を明らかにし，つぎに静電場を利用した駆動機構として静電マイクロ斜毛・斜板駆動機構と静電紙送り機構を，また放電場を利用したマイクロ駆動機構と微小液滴吐出機構の開発を行った．以下に詳細を示す．

本論文は，第1章から第9章までの9章から構成されており，第1章では序論，第2章から第8章までで本論，第9章では結論を述べる．

第1章の序論では，研究の背景に続いて，静電駆動機構の特徴として，磁気力と静電力の特徴の比較，マイクロ化に際して重要な摩擦に対する工夫，および放電場における力学について概説し，最後に本論文の構成について述べた．

第2章～第4章では，静電場，コロナ放電場，および火花放電場における力学特性の把握を行った．

まず第2章では，静電場・コロナ放電場における力学に関して述べた．周知のように静電場では，電極同士が引き合う方向に印加電圧の2乗に比例する力が作用する．いっぽうコロナ放電場では，放電特性に関しては多くの研究が行われてきたが，力学特性は明確ではなかった．そこで針対平板電極系を対象にして，コ

コロナ放電特性に関する解析的・実験的研究を行った。具体的には、まずコロナ放電場を単極性モデルによって解析し、場における電位分布と電荷分布を計算した。またこれらが、実測値とよく一致することを示した。さらに、静電域におけるクーロン力の計算値も実験値によく一致することを示した。いっぽうコロナ放電域における力学特性は、電場解析だけでは求まらないため、本章ではまず実験的な特徴を明らかにし、つぎの第3章における流れ解析につなげた。

第3章では、コロナ放電場において力が発生する原因であると考えられるイオン風に関する解析的・実験的研究について述べた。具体的には、第2章で行った放電場解析から導出されるコロナ放電場の電荷密度と電界の積で表されるイオンの泳動力（体積力）を駆動源とする非圧縮性粘性流体に関するナビエ・ストークスの式を解いて流速と圧力分布を計算し、これらが実験結果と一致することを検証した。液体平板電極を利用するユニークな流速と圧力分布の測定方法についても報告した。

第4章では、火花放電場における力学に関して述べた。コロナ放電場よりもさらに高い電圧を印加すると、断続的に火花放電が発生し、同時に放電音や光が発生するが、3つの互いに独立な方法で、火花放電場では有意な力は生じていないことを実証した。火花放電域における力学に関する研究はこれまで行われておらず、これは新規な知見である。

以上の第2章～第4章の研究のまとめとして、工学的に利用可能な力は、静電場におけるクーロン吸引力とコロナ放電域におけるイオン風の反力であることを示した。

第5章、第6章では、静電場におけるクーロン力を利用した機器を提案した。

第5章では、従来の摩擦力の代わりに静電力を利用して、用紙束から紙1枚だけを分離し搬送するまったく新しい用紙の分離・搬送機構に関して述べた。本機構によって、実用的な条件で信頼性の高い紙送り機構の実用化のめどを得たことを報告する。

第6章では、交番的な静電力による振動と摩擦力を利用したマイクロ駆動機構に関して述べた。摩擦係数に異方性があるシート材の上面に押し付け力を加えると直交する方向の駆動力が発生することを利用した斜毛・斜板・斜柱駆動機構は、これまで振動源として油圧、磁気力、圧電素子を利用した例が報告されているが、いずれも外部に大きな動力源や複雑な構造が必要であった。そこで本研究では、振動源として静電力を利用する方式を提案し、マイクロ化に適した数種のモデルを試作してその駆動特性を解析と実験の両面から明らかにした。一方向直進だけでなく後進や回転する機構、および給電リード線を不要とする機構も開発した。

つぎに、第7章、第8章では、コロナ放電場で生じる力を利用した機器を提案した。

第7章では、コロナ放電場におけるイオン風の反力を駆動源とする新しいリニ

ア・回転駆動機構を提案した。これらの駆動機構は、従来のいわゆるコロナモータの延長ではなく、平板に対して傾斜した針電極には、電極間距離が最小になる垂直方向ではなく、傾斜した針に沿う方向の反力が生じるとの新しい発見にもとづくものである。

第8章では、別の放電場応用として、コロナ放電場に生じる力を利用した微小液滴吐出に関して述べた。針電極の代わりに液体を満たしたチューブに電圧を印加すると、静電力によって液滴が吐出する静電スプレー現象が生じるが、この現象そのものの体系的な検討は十分ではない。この現象を工学的に利用するためには、まず現象の基礎特性を明らかにすることが重要であり、液滴形成・分離機構やその特徴を明らかにする実験を行った。またこれらの知見をもとに、本機構が印字技術に応用可能なことを実証した。

最後に第9章では、本論文を総括し、さらに今後の課題について言及した。

以上のとおり本研究では、静電力応用の観点から、静電場・放電場における力学を解明し、それを利用するマイクロ駆動機構の開発を行った。本研究の成果を要約すれば以下のとおりである。すなわち、まず静電場、コロナ放電場、および火花放電場における力学を解析と実験の両面から検討し、工学的に利用可能な力は、静電場におけるクーロン吸引力とコロナ放電域におけるイオン風の反力であることを示した。さらに、これらの知見にもとづいた用紙の静電分離・搬送機構、静電力と摩擦を組み合わせたマイクロ駆動機構、コロナ放電時のイオン風の反力を利用したマイクロ駆動機構、および微小液滴吐出機構を開発した。

## 研 究 業 績

種類別	著者，題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年
投稿論文	Kawamoto, H., Yasuda, H. and <u>Umez</u> , S., Flow distribution and pressure of air due to ionic wind in pin-to-plate corona discharge system, <i>J. Electrostatics</i> (to be published).
投稿論文	梅津信二郎, 白石潤平, 川本広行, 伊東圭昌, 静電力を利用したマイクロ斜毛・斜板駆動機構, 機械学会論文集 C, <b>71</b> , 706 (2005) 1884-1891.
投稿論文	梅津信二郎, 白石潤平, 西村秀明, 川本広行, 静電力を利用した用紙の分離と搬送機構, 機械学会論文集 C, <b>71</b> , 704 (2005) 1361-1367.
投稿論文	Kawamoto, H. and <u>Umez</u> S., Electrohydrodynamic Deformation of Water Surface in a Metal Pin to Water Plate Corona Discharge System, <i>J. Phys. D: Appl. Phys.</i> , <b>38</b> (2005) 887-894.
投稿論文	Kawamoto, H., <u>Umez</u> , S. and Koizumi, R., Fundamental Investigation on Electrostatic Inkjet Phenomena in Pin-to-Plate Discharge System, <i>J. Imaging Sci. Technol.</i> , <b>49</b> , 1 (2005) 19-27.
投稿論文	梅津信二郎, 川本広行, 針対平板電極系放電場に生じる力を利用するマイクロ駆動機構, 機械学会論文集 C , <b>70</b> , 699 (2004) 3260-3265.
投稿論文	梅津信二郎, 曾我部広, 川本広行, 針対平板電極系放電場における火花放電時に働く力について, 機械学会論文集 C, <b>70</b> , 692 (2004) 1149-1154.
投稿論文	川本広行, 安田悠, 梅津信二郎, 針対平板電極系コロナ放電場におけるイオン風について, 機械学会論文集 C, <b>70</b> , 689 (2004) 169-175.
投稿論文	川本広行, 梅津信二郎, 小泉竜太, 白石潤平, 針対平板電極系放電場における静電静水力学効果について, 機械学会論文集 C, <b>69</b> , 678 (2003) 328-334.
国際会議	<u>Umez</u> , S., Hodaka, S. and Kawamoto, H., Droplet Formation and Dropping Position Control in Electrostatic Inkjet Phenomena, <i>NIP21: Proc. of the 21th International Conference on Digital Printing Technologies</i> (2005) 283-286.
国際会議	<u>Umez</u> , S., Shiraishi, J. and Kawamoto, H., New Paper Feed Mechanism Utilizing Electrostatic Force, <i>NIP20: Proc. of the 20th International Conference on Digital Printing Technologies</i> (2004) 194-197.
国際会議	<u>Umez</u> , S., Shiraishi, J. and Kawamoto, H., Micro Driving Mechanism Utilizing Pin-to-Plate Gas Discharge Field, <i>Proc. of the 14th Conference on Information Storage and Processing Systems ASME Information Storage and Processing Systems Division</i> (2004).

種類別	著者，題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年
国際会議	<u>Umezū, S.</u> , Shiraishi, J. and Kawamoto, H., Micro Electrostatic Driving Mechanism utilizing a Slanted-Fibers Sheet, <i>Proc. of the 14th Conference on Information Storage and Processing Systems ASME Information Storage and Processing Systems Division</i> (2004).
国際会議	<u>Umezū, S.</u> , Shiraishi, J., Nishimura, H., and Kawamoto, H., Paper Separation and Feed Mechanisms Utilizing Electrostatic Force, <i>NIP19: Proc. of the 19th International Conference on Digital Printing Technologies</i> (2003) 559-532.
国際会議	Kawamoto, H., <u>Umezū, S.</u> , and Shiraishi, J., Paper Separation and Feed Utilizing Electrostatic Force, <i>Proc. of the JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (IIP/ISPS Joint MIPE)</i> (2003) 329-330.
国際会議	Kawamoto, H., Arai, K., Koizumi, R. and <u>Umezū, S.</u> , Electrostatic Inkjet Phenomena Utilizing Pin-to-Plate System, <i>Proc. of the JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (IIP/ISPS Joint MIPE)</i> (2003) 327-328.
国際会議	Kawamoto, H., Takasaki, K., Yasuda, H., <u>Umezū, S.</u> , and Arai, K., Static and Dynamic Phenomena of Pin Electrode in Pin-to-Plate Discharge system, <i>Proc. of the 3rd IFToMM International Micromechanism Symposium</i> (2001) 69-74.
講演	梅津信二郎，山村雄一，安藤大樹，増成幸数，佐藤寛暢，川本広行，静電力を利用したリードレス斜柱駆動機構，機械学会情報・知能・精密部門 (IIP 部門) 講演会 (2005) 140-142.
講演	鳥飼建宏，梅津信二郎，山村雄一，福山明，川本広行，コロナ放電場を利用したマイクロ送風機構，機械学会情報・知能・精密部門 (IIP 部門) 講演会 (2005) 136-139.
講演	岡田洋司，梅津信二郎，曽我部広，黒宮直幸，川本広行，静電選別を利用した粒度分別，機械学会情報・知能・精密部門 (IIP 部門) 講演会 (2005) 133-135.
講演	鈴木穂高，梅津信二郎，川本広行，静電インクジェット現象における液滴の帯電，Japan Hard Copy 2004 Fall Meeting (2004) 37-40.
講演	川本広行，白石潤平，梅津信二郎，伊東圭昌，静電力を利用する斜毛駆動機構の運動解析，2004 年度機械学会年次大会，5 (2004) 375-376.
講演	梅津信二郎，白石潤平，岡田洋司，川本広行，静電力を利用する紙の搬送機構，第 16 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2004) 65-68.
講演	鈴木穂高，梅津信二郎，小泉竜太，川本広行，静電インクジェット現象における微小液滴吐出，機械学会情報・知能・精密部門 (IIP 部門) 講演会 (2004) 254-257.
講演	川本広行，新井健治，小泉竜太，梅津信二郎，針対平板電極系放電場における静電インク

種類別	著者，題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年
	ジェット現象，電気学会放電研究会，ED-03-248 (2003) 51-58.
講 演	山村雄一，梅津信二郎，川本広行，村田明彦，池尻徳貴，吉沢正昭，針対平板電極系放電場におけるイオン風について，D&D2003 (2003) 94.
講 演	梅津信二郎，白石潤平，川本広行，静電力を利用した紙の分離に関する研究，2003 年度機械学会年次大会，5 (2003) 287-288.
講 演	白石潤平，梅津信二郎，黒宮直幸，川本広行，斜毛シートを用いた静電駆動機構について，2003 年度機械学会年次大会，5 (2003) 285-286.
講 演	梅津信二郎，西村秀明，川本広行，静電力を利用する用紙剥離・搬送機構，Japan Hardcopy 2003 (2003) 73-76.
講 演	西村秀明，梅津信二郎，白石潤平，川本広行，静電力を利用する紙の分離機構，第 15 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2003) 219-222.
講 演	梅津信二郎，安田悠，曾我部広，川本広行，針対平板電極系放電場における火花放電時に働く力について，第 15 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2003) 213-218.
講 演	西村秀明，梅津信二郎，白石潤平，川本広行，静電力による紙の分離機構，機械学会関東学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演会 (2003) 5-6.
講 演	川本広行，梅津信二郎，小泉竜太，白石潤平，安田悠，針対平板電極系放電場における静電静水力学効果について，電気学会放電研究会資料，ED-03-2，DEI-03-7 (2003) 7-13.
講 演	梅津信二郎，白石潤平，川本広行，静電力を利用するリニア駆動機構，機械学会 D&D2002 (2002) 278.
講 演	安田悠，梅津信二郎，小泉竜太，白石潤平，川本広行，針対平板電極系放電場におけるイオン風について，機械学会 D&D2002 (2002) 276.
講 演	梅津信二郎，白石潤平，林怜史，川本広行，針対平板電極系放電場を利用する水上移動機構について，2002 年度機械学会年次大会，7 (2002) 237-238.
講 演	川本広行，白石潤平，梅津信二郎，小泉竜太，針対平板電極系放電場における静電モーゼ効果，第 14 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2002) 145-150.
講 演	川本広行，小泉竜太，梅津信二郎，白石潤平，複数の針対平板電極系放電場における針電極の干渉現象，第 14 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2002) 141-144.
特 許	川本広行，梅津信二郎，シート分離機構，特許出願番号: 2003-353060.
受 賞	梅津信二郎，白石潤平，川本広行，2003 年度機械学会年次大会，"情報・知能・精密機器部門ベストプレゼンテーション表彰 (2004).

